

Velocidade da Luz - 2

Introdução

Até o século XVII, e tendo por base observações astronômicas como os eclipses lunares, por exemplo, acreditava-se que a luz era transmitida instantaneamente. Já que tal afirmação necessitava de uma comprovação contundente, várias foram as tentativas para determinar a velocidade da luz. Dentre elas, costuma-se citar a de *Galileu Galilei* e o seu experimento das duas lanternas separadas por uma grande distância. Nada consta a respeito do valor obtido ou, até mesmo, se o experimento foi de fato realizado. A primeira tentativa bem sucedida (e documentada) é atribuída a *Ole Rømer* a partir da observação das luas de Júpiter [1]. O valor encontrado para a velocidade da luz c , em 1676, foi de 2.20×10^5 km/s e foi determinado por *Christiaan Huygens* com os dados experimentais fornecidos por *Rømer* [2]. À dupla *Rømer-Huygens* seguiram-se vários ilustres cientistas, os quais se utilizaram dos mais diferentes métodos [3]: *James Bradley* em 1729 ($c = 3.01 \times 10^5$ km/s, a partir da aberração da luz), *Hippolyte Fizeau* em 1849 (3.15×10^5 km/s, "roda dentada"), *Léon Foucault* em 1862 (2.98×10^5 km/s, espelho giratório), *Rosa&Dorsey* em 1906 (2.99710×10^5 km/s, $(\mu_0 \epsilon_0)^{-1/2}$), *Albert Michelson* em 1826 (2.99796×10^5 km/s, espelho giratório), *Essen&Gordon-Smith* em 1950 (2.99792×10^5 km/s, cavidade ressonante), *Froome* em 1958 (2.99792×10^5 km/s, interferometria com ondas de rádio), *Evenson & Colab.* em 1972 (2.99792×10^5 km/s, interferometria laser), até o valor atualmente aceito de 299 792.458 km/s.

Objetivos

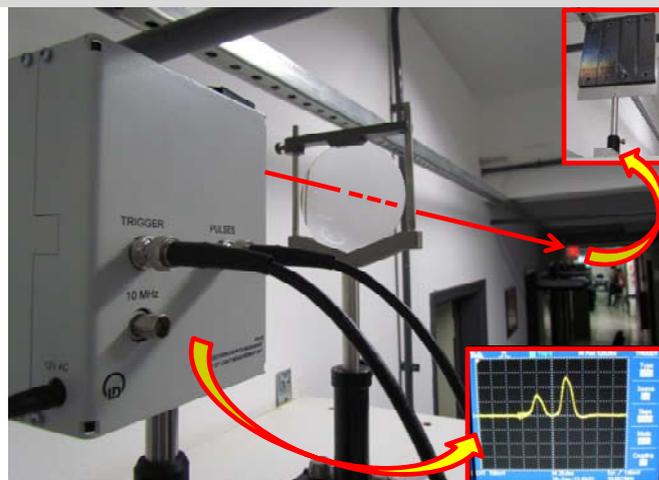
☞ Determinação experimental da velocidade da luz.

(Para tanto, o estudante deverá familiarizar-se com técnicas de alinhamento óptico, e com a utilização de um osciloscópio para medir o intervalo de tempo gasto para um pulso de luz percorrer uma distância pré-estabelecida.)

☞ Comparar o resultado obtido com o esperado e discuti-los.

Equipamentos

- 1 módulo *Leybold*
(inclui: LED, detector, gerador de pulsos, separador de feixes, fonte de alimentação, e suporte)
- 1 lente $f = 20\text{ cm}$ ($\phi = 12\text{ cm}$)
- 1 conjunto de refletores com suporte
- 1 osciloscópio digital
- Suportes, trena, cabos, etc.



Descrição do Experimento

De maneira análoga ao experimento *Velocidade da Luz-1*, esta prática requer a determinação do “tempo de voo” de um pulso de luz (extremamente curto) enquanto descreve uma trajetória pré-definida. De fato, para distâncias entre 10–20 m, “tempos de voo” da ordem de 65–130 ns podem ser facilmente medidos com o auxílio de um osciloscópio digital ($\geq 20\text{ MHz}$).

De acordo ao diagrama apresentado na Figura 1, a radiação emitida por um LED (*light emitting diode*) de alta performance é modulada por um oscilador de modo a produzir pulsos de luz ($\lambda = 615\text{ nm}$) com duração aproximada de 20 ns e taxa de repetição de 40 kHz. Os pulsos de luz gerados pelo LED passam por um espelho semi-transparente S tal que parte da radiação – o sinal de referência – é refletida por T_2 e atinge o foto-detector D. O restante da radiação segue pela janela F_1 , percorrendo a distância pré-estabelecida pela trajetória $F_1 \rightarrow L \rightarrow T_1 \rightarrow L \rightarrow F_1 \rightarrow S \rightarrow D$. Os pulsos de luz recebidos pelo foto-detector são transformados em pulsos de tensão, os quais podem ser visualizados na tela de um osciloscópio.

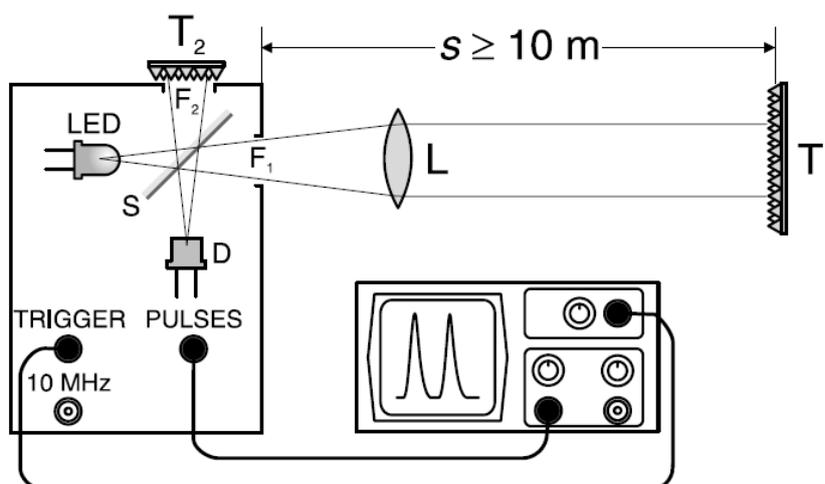


Figura 1 – Diagrama da montagem para a determinação experimental da velocidade da luz.

Procedimento Experimental

Considere o diagrama da Figura 1 para fazer o alinhamento óptico do sistema e para realizar as suas medidas experimentais.

Alinhamento óptico

1 – Faça com que o módulo *Leybold* e a lente L estejam dispostos e firmemente presos a um único trilho óptico.

 Verifique se o refletor T_2 está devidamente posicionado (e fixo!) sobre a janela F_2 .

2 – Garanta que a lente L esteja posicionada a ~ 20 cm do módulo *Leybold* e que a altura de seu centro coincida com o centro da janela F_1 .

3 – Repita o procedimento para o conjunto de refletores: posicione-o sobre um trilho óptico independente, e faça com que a altura do seu centro coincida com F_1 e com L.

4 – Posicione os dois trilhos ópticos (módulo *Leybold* + lente L & conjunto de refletores) sobre suportes suspensos (disponíveis no corredor do LEF) separados por ~ 10 m.

5 – Ligue o módulo *Leybold* à sua fonte de alimentação. Direcione a luz emitida pelo módulo *Leybold* + lente L para o conjunto de refletores e procure fazer com que este esteja (praticamente) todo iluminado e produzindo uma reflexão intensa. Faça este processo com o auxílio de um colega, e simulando o “ângulo de visão” da janela F_1 (i.e., olhando rasante sobre o módulo *Leybold*).

6 – Ajustes adicionais no alinhamento óptico devem ser feitos com o auxílio do osciloscópio. Faça as conexões *Pulses*→*Channel 1* e *Trigger*→*Ext Trig*, por exemplo, e ajuste o osciloscópio de acordo com os seguintes parâmetros (os quais são dependentes das especificações do osciloscópio utilizado e das características do sinal a ser analisado):

Operating mode: Channel 1 only, DC, 5–100 mV

Triggering: automatic, external, AC, + (rising edge)

Time-base sweep: 0.2 μ s/cm, cal.

 Utilize apenas cabos coaxiais e conectores BNC (50 Ω e ~ 1 m).

7 – Nesta etapa, dois sinais devem ser observados na tela do osciloscópio (Figura 2): um correspondente ao sinal de referência (U_0), e outro devido ao pulso de luz que “viajou” até o conjunto de refletores e retornou (U_1).

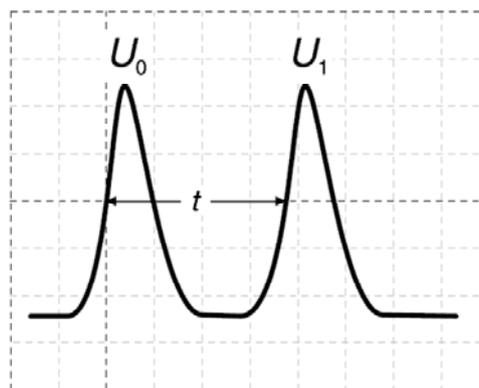


Figura 2 – Exemplo de tela apresentada pelo osciloscópio, denotando a intensidade do sinal detectado pelo fotodetector D (tensão no eixo y), em função do tempo (eixo x). De acordo à configuração do experimento, um sinal de referência U_0 deve ocorrer instantaneamente ($t=0$), enquanto aquele que é refletido pelo conjunto de refletores (U_1) tarda um tempo t (\propto proporcional à distância percorrida).

8 – Pequenos ajustes nos refletores T_1 e T_2 fazem com que a intensidade dos sinais U_0 e U_1 fiquem praticamente iguais. Desta forma, e assim como indicado na Fig. 2, o “tempo de vôo” t dos pulsos de luz é dado pelos pontos médios da ascensão dos sinais U_0 e U_1 . Resultados semelhantes podem ser obtidos a partir da separação entre os máximos dos sinais U_0 e U_1 – registre os valores experimentais em ambos os casos para discussões futuras.

Conceitos envolvidos

Assim que um pulso de luz é emitido pelo módulo *Leybold*, um sinal de disparo (*trigger*) é simultaneamente enviado para o osciloscópio. Desta forma, e desde que o refletor T_2 esteja devidamente posicionado, a tela do osciloscópio sempre registra os sinais U_0 e U_1 dentro da mesma base de tempo. Enquanto o sinal U_0 é praticamente instantâneo (idealmente em $t = 0$), o sinal U_1 encontra-se defasado de um tempo $t \propto s$.

 Lembre-se que, em função da configuração experimental adotada, o pulso de luz definido por U_1 percorre a distância $2s$ (ver Fig. 1).

Medidas experimentais

Diferentes valores de t podem ser obtidos variando-se a distância s entre o módulo *Leybold* e o conjunto de refletores. Repita este processo (várias vezes) para diferentes valores de s , sempre registrando os correspondentes valores de “tempo de vôo”.

De posse dos valores de s e t , a velocidade da luz pode ser determinada a partir de uma representação gráfica dos valores obtidos. Procure aproveitar os diferentes valores de t obtidos (a partir dos pontos médios de ascensão de U_0 e U_1 , e de seus máximos de intensidade). A fim de minimizar os erros experimentais associados, utilize o método dos mínimos quadrados. Compare, e discuta, o resultado obtido com aqueles encontrados na literatura.

Questões

! Qual o valor atualmente aceito para a velocidade da luz, e como foi determinado? Discuta brevemente acerca das principais técnicas utilizadas para a determinação de c .

! Explique os conceitos de velocidade de grupo e de velocidade de fase. No experimento em questão, qual velocidade foi medida?

! Tendo em vista o experimento realizado e o valor encontrado para a velocidade da luz, que tipo de melhoria(s) poderia(m) ser feita(s) a fim de melhorá-lo?

! Os refletores utilizados neste experimento são chamados de *espelhos triplos*, e têm como característica principal refletirem segundo um ângulo de 12° e serem de fácil alinhamento. Procurem maiores informações a respeito deste tipo de refletor, bem como de outros (olho de gato, retro-refletor, etc.).

! Discuta a respeito das fotos-figuras apresentadas na primeira página deste roteiro. Você consegue identificá-las todas? O que significam e a que se referem?

Referências

Física Moderna

College Physics (OpenStax College, 2012) <http://cnx.org/content/col11406/latest/>.

Paul Tipler, *Física Moderna* (Guanabara Dois, 1981) – **539^T595f**

Robert Eisberg e R. Resnick, *Física Quântica* (Ed. Campus, 1979) – **530.12^E36f**

Eletromagnetismo & Óptica

R. Reitz, F. J. Milford, e R. W. Christy, *Fundamentos da Teoria Eletromagnética* (Campus, 1982) – **530.141^R379ft**

E. Hecht, *Optics* (Addison-Wesley, 1974) – **535^H4470**

G. R. Fowles, *Introduction to Modern Optics* (Dover Publications, 1989) – **535^F789i**

História (conforme apresentadas na Introdução)

[1] http://www-obs.univ-lyon1.fr/labo/fc/ama09/pages_idsc/pages/idsc_1676_lumiere.pdf (em Francês) & <http://rstl.royalsocietypublishing.org/content/12/133-142/893> (em Inglês).

[2] [http://www.jstor.org/sici?sici=0021-1753\(194004\)31:2%3C327:RATFDO%3E2.0.CO;2-4](http://www.jstor.org/sici?sici=0021-1753(194004)31:2%3C327:RATFDO%3E2.0.CO;2-4)

[3] http://en.wikipedia.org/wiki/Speed_of_light & <http://www.speed-light.info/measurement.htm>

Experimento

Roteiro experimental (original *Leybold*) – http://141.7.70.49/docs/47650de_en.pdf

Simulações

<http://www.cco.caltech.edu/~phys1/java/phys1/MovingCharge/MovingCharge.html>

Créditos

O texto aqui apresentado é uma tradução livre do roteiro elaborado pela *Leybold* (fabricante do aparato experimental) e foi feita pelo Prof. A. R. Zanatta. As figuras-diagramas foram extraídas do roteiro original da *Leybold*.

A foto da montagem experimental (com o detalhe do espelho triplo + tela do osciloscópio) foi feita pelo Prof. A. R. Zanatta.

As fotos-figuras apresentadas na pg. 1 foram obtidas da *internet*.